DOI:10.11931/guihaia.gxzw201909020

山西吕梁山草本群落物种多样性的海拔梯度格局及与环境因子的关系

张世雄，秦瑞敏，杨晓艳，温 静，徐满厚*
（太原师范学院 地理科学学院，山西 晋中 030619）

摘 要：山地草本群落物种多样性的海拔梯度格局及其与环境因子的关系一直是生态学和地理学研究的热点问题。为探究吕梁山草本群落不同尺度物种多样性（α、β、γ 多样性）的海拔梯度格局及其与环境因子的关系，该研究采用样方法在吕梁山从北向南选取管涔山、关帝山、五鹿山，并对每个山地划分出高、中、低 3 个海拔梯度，对草本群落物种多样性和环境因子进行调查分析。结果表明：（1）α 多样性随海拔升高呈先升后减的单峰变化格局，峰值出现在中海拔；β 多样性中 Cody 指数在 1 900~2 000 m 间出现峰值，而 Bray-Curtis 指数出现最小值，表明 1 900~2 000 m 海拔带是草本群落物种更新速率和组成变化较快的过渡地带；γ 多样性随海拔升高也呈先升后减的单峰变化格局（R^2=0.406，P＜0.01）。（2）海拔对温度、湿度变化的影响极其显著（P＜0.01），海拔、温度、湿度等环境因子共同影响着物种的 α 多样性，其中海拔是主要影响因素（P＜0.05），温度、湿度影响不显著（P＞0.05）。因此，吕梁山草本群落多样性在海拔梯度上多表现为"中间膨胀"变化格局，海拔变化是影响多样性变化的主要因素。本研究对吕梁山系草本群落研究进行一定的补充和完善，并为该地区的草本生态资源的管理提供参考。

关键词：吕梁山，草本群落，物种多样性，海拔梯度，环境因子
中图分类号： Q948.15　　　　**文献标识码：** A

Patterns of species diversity in herbaceous communities at different altitude gradients and their relationships with environmental factors in the Lüliang Mountains in Shanxi Province, China

ZHANG Shixiong, QIN Ruimin, YANG Xiaoyan, WEN Jing, XU Manhou*
(*Institute of Geography Science, Taiyuan Normal University*, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: Patterns of species diversity in mountain herbaceous communities at different altitudes

基金项目：国家自然科学基金（41671142, 41501219）；山西省软科学研究一般项目（2018041072-1）；山西省高等学校哲学社会科学研究项目（2019W134）；太原师范学院研究生教育改革研究课题（SYYJSJG-1707）；太原师范学院研究生教育创新项目（SYYJSJC-1917）[Supported by the National Natural Science Foundation of China(41671142, 41501219); The Soft Science Research Project of Shanxi Province (2018041072-1); The Higher School of Philosophical and Social Sciences Projects of Shanxi Province (2019W134); Research Project on Postgraduate Education Reform of Taiyuan Normal University (SYYJSJG-1707); Innovation Project of Postgraduate Of Taiyuan Normal University(SYYJSJC-1917)]。

作者简介：张世雄（1993-），男，河南洛阳人，硕士研究生，研究方向为资源评价与开发、山地生物多样性，（Email）Zzhangshixiong@163.com。
***通信作者：**徐满厚，博士，副教授，主要从事区域气候变化及其影响研究，（Email）xumh@tynu.edu.cn。

and their relationships with environmental factors is an enduring hot topic within ecological and geographical research. This topic was explored in the context of the mountains of Guancen, Guandi, and Wulu that extend from north to south across the Lüliang mountain range in Shanxi Province in China. Each mountain was divided into three altitudinal gradients: high, middle, and low. During the vegetation growing season in 2018, an investigation was conducted on the growth characteristics indicators of plants and hydrothermal factors located within these altitudinal gradients and species diversity index values (*α*-, *β*-, and *γ*-diversity) were calculated to explore the patterns of species diversity at different altitudes and their relationships with environmental factors. The results revealed unimodal patterns of variation for *α*-diversity (calculated using the Simpson, Shannon-Wiener, and Pielou indexes) that corresponded to increasing altitudes, with the highest species diversity occurring at the mid-altitude gradient. The results calculated for *β*-diversity using different indexes revealed the highest value for the Cody index and the lowest value for the Bray-Curtis index at altitudes between 1 900 m and 2 000 m, indicating that areas located between 1 900 m and 2 000 m form a transition zone in which the herbaceous community undergoes a rapid process of species renewal and changes in its composition. The results for *γ*-diversity indicated a pattern of unimodal variation in relation to altitude. Changes in altitude gradient had highly significant impacts on changes in temperature and humidity (P<0.01). Various environmental factors, notably altitude, humidity, and temperature had a combined effect on changes in the values of the *α*-diversity indexes, with altitude being the main influencing factor (P<0.05). Changes in temperature and humidity had no significant effect on species diversity (P>0.05). Therefore, species diversity within the herbaceous community in the Lüliang Mountains predominantly showed a “mid-altitude bulge” pattern, with altitude being the main factor affecting changes in species diversity. The finding of this study can contribute to refining and expanding studies of herbaceous communities in this region and provide inputs for advancing the systematic conservation and management of herbaceous resources.

Key words: Lüliang Mountains, herbaceous community, species diversity, altitude gradient, environmental factors

山地系统通常具有较宽阔的水热梯度和生境异质性（Sheldon et al.，2011），海拔、地形的变化直接导致热量、水分等环境因子改变，进而影响山地植被的物种组成和群落结构（Wang et al.，2002）。山地植被群落是陆地生态系统的重要组成成分，具有调节气候、保护多样性、增强生产力等生态功能（Fraser et al.，2015）。物种多样性作为植被群落的重要指标能够揭示生态系统变化，维持生态系统生产力（金少红等，2017），反映植被生境中的地理环境要素与群落生长的相互关系（朱丽等，2017；Kessler，2000）。探索植被群落物种多样性的空间变化格局一直是生态学的核心问题之一，是理解并阐释群落构建机制的关键所在（Gaston et al.，2007）。

物种多样性空间格局的差异性能够反映出物种的生物学、生态学特性、分布状况及其对环境的适应性（贺金生和陈伟烈，1997）。目前对于多样性的研究多集中于垂直方向上的海拔梯度变化（刘洋等，2009）：一般情况下随海拔变化 *α* 多样性呈较为普遍的“中间高度膨胀”（苏闯等，2018；罗黎鸣等，2014）和负相关关系（卢训令等，2010）；*β* 多样性随海拔升高而下降（Wang et al.，2002）；*γ* 多样性呈偏峰分布格局和负相关格局（唐志尧和方精云，2004）。不同尺度下物种多样性的变化格局与其山地所处的水热环境、地质地貌等众多因素有关（Whittaker et al.，2001; Rey & Scheiner，2002）：*α* 多样性与环境能量密切相关；*β* 多样性主要受土壤、地貌、干扰等影响；*γ* 多样性与水热气候、物种形成及演化的历史有关。因此，研究不同山地生态系统物种多样性的空间变化及其环境解释，对于山地生态系统的保

护与管理具有重要意义和价值。

吕梁山系位于黄土高原东部，水土流失严重，是典型的生态环境脆弱区（徐满厚等，2018），其草本植被群落结构单一，干扰因素相对较少，是探究植被多样性空间变化及与环境因子关系等关键机制的理想场所（Tang et al.，2012）。近年来有关吕梁山的植被研究多是对单个山体如五鹿山、关帝山等（何艳华等，2013），缺乏将其作为一个整体来进行山地植被空间分异格局的系统性研究，且对于林下草本层植物的研究并不充分。基于此，本研究在吕梁山设置不同海拔和纬度梯度的草本群落样地，详细调查了草本植物的物种组成、生长特征、群落结构以及与其生长紧密相关的水热因子，研究吕梁山草本群落物种多样性的空间变化，并探讨其与环境因子的关系，以进一步阐释：（1）吕梁山草本群落不同空间尺度物种多样性（α、β、γ 多样性）的分布特征；（2）不同环境因子（海拔、温度、湿度）对物种多样性的影响。通过深入探讨物种多样性的空间分布格局及其与环境因子的关系，以期为吕梁山区的植被保护与生态管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吕梁山系南北延长约 400 km，纬度跨度近 3 °，属温带季风气候区，土壤主要是黄绵土和栗褐土，从北向南主要包括管涔山、关帝山和五鹿山（图 1）。管涔山位于忻州市宁武县东寨镇（112°36′—112°37′ E、38°57′—39°03′ N），年均气温 6.5 ℃，年均降水量 475 mm；土壤类型主要是山地褐土、棕壤，乔木是以云杉和华北落叶松为主的针阔叶混交林，其平均高度 12.5 m，平均密度约每平方米 0.15 棵。关帝山位于吕梁市交城县庞泉沟镇（110°18′—111°18′ E、37°20′—38°20′ N），年均气温 3.5 ℃，年均降水量 831 mm；土壤类型为淡褐土、棕壤和亚高山草甸土，乔木以桦树、云杉和华北落叶松为主，其平均高度 10 m，平均密度约每平方米 0.13 棵。五鹿山位于临汾市蒲县和隰县交界处（111°2′—111°18′ E、36°23′—36°38′ N），年均气温 10.8 ℃，年均降水量 490 mm；土壤类型为棕壤、褐土、草甸土、山地草甸土 4 个土类，乔木是以辽东栎、油松为主的地带性植被落叶阔叶林，其平均高度 6.5 m，平均密度约每平方米 0.11 棵。

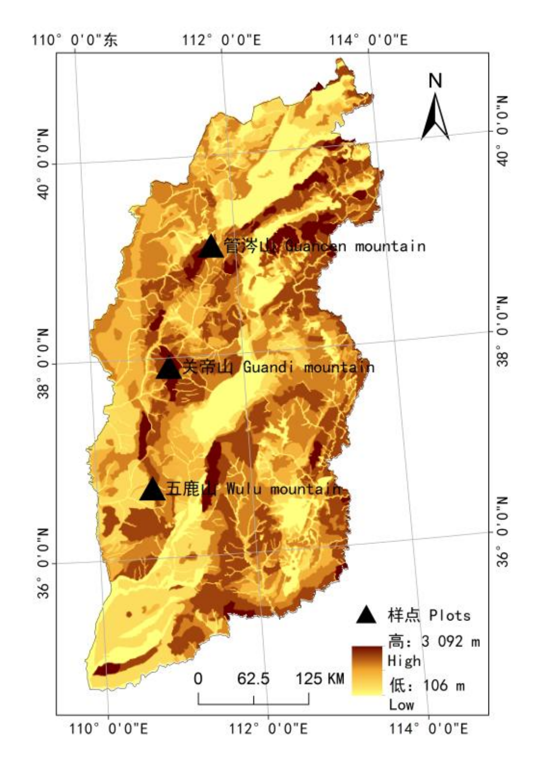


图 1 吕梁山调查样地分布示意图

Fig.1 Distribution of survey samples over the Lüliang Mountains

1.2 样地设置

首先，在水平方向上沿纬度梯度将吕梁山分为北部的管涔山、中部的关帝山和南部的五鹿山，进行吕梁山草本群落植被生长特征的水平格局（纬度梯度）调查；其次，在垂直方向上进行垂直变化特征调查：根据管涔山、关帝山和五鹿山的实际高度，分别划分高、中、低3 种海拔梯度，在整个吕梁山划分出的 9 个海拔梯度，在每一海拔梯度，选取植被生长均匀、物种丰富的草本群落进行实验样地布设（杨晓艳等，2018），样地面积为 35~40 m^2，采用随机区组方法设置 1 m×1 m 的调查样方，各样方间距为 1~3 m，每个海拔设置 3 个调查样方，共设置 27 个调查样方。1 300~1 400 m（1 318 m）海拔梯度由于实际调查和数据分析时发现属于特殊异常数据，故在分析中舍弃此海拔梯度。

1.3 植被特征调查

于 2018 年 8 月植被生长季对吕梁山草本群落的生长特征进行调查，包括高度、盖度、密度、频度；采用大小为 0.5 m×0.5 m 的样方框测量草本群落特征值，按物种进行统计。其中，记录样方框中的所有物种的名称和数量（多度），频度需计算物种出现的网格数，盖度需计算物种覆盖的网格数，高度用卷尺测定物种处于自然状态下的最高部分。调查时将草本层中的乔木、灌木、藤本植物幼苗归入草本群落，同时用 GPS 记录每块样地的纬度、经度、海拔（表 1）。

表 1 吕梁山样地地理梯度范围

Table 1 Geographical gradient range of the plots selected over the Lüliang Mountains

位置 Location	样地 Plots	经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)	海拔 Altitude (m)	海拔梯度范围 Altitude gradient range (m)
北部 Northern part	管涔山高 High position in Guancen mountain	111.94	38.76	2 571	2 500~2 600

	管涔山中 Center position in Guancen mountain	111.96	38.78	2 395	2 300~2 400
	管涔山低 Low position in Guancen mountain	111.97	38.79	2 222	2 200~2 300
中部 Central part	关帝山高 High position in Guandi mountain	111.43	37.89	2 179	2 100~2 200
	关帝山中 Center position in Guandi mountain	111.44	37.88	2 001	2 000~2 100
	关帝山低 Low position in Guandi mountain	111.45	37.87	1 900	1 900~2 000
南部 Southern part	五鹿山高 High position in Wulu mountain	111.18	36.52	1 602	1 600~1 700
	五鹿山中 Center position in Wulu mountain	111.17	36.51	1 459	1 400~1 500
	五鹿山低 Low position in Wulu mountain	111.16	36.50	1 318	1 300~1 400

1.4 环境因子调查

空气-土壤水热因子的观测是在植被调查完毕之后进行，时间选在 2018 年植被生长的旺盛期（8 月）。在样地上方中间位置距地面 10 cm 高度处架设带有防辐射罩（RS3-B）的探头（S-THB-M008）实时测定空气温度和湿度；在样地中距离地表 10 cm 深度埋设测量土壤水分（S-SMD-M005）和温度（S-TMB-M006）的传感器探头，所使用仪器均来自美国 Onset 计算机公司生产的 HOBO 系列产品。不同山体不同海拔梯度的水热环境因子观测是在每天的同一时间点开始连续观测 24 h，并采用数据采集器（H21-US）以 1 min 为时间间隔存储数据。用同一天内的环境因子数据和植被多样性数据进行相关分析，得到环境因子对植被多样性的影响。

1.5 数据统计分析

1.5.1 α 物种多样性

α 多样性为生境内多样性，表征局部均质生境下的物种数量。采用相对高度、相对多度、相对盖度和相对频度 4 个指标计算物种重要值，进而得到 α 多样性指数，主要包括 Simpson 指数、 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数，其计算公式如下：

$$IV=\frac{rh+ra+rc+rf}{4} \quad (1)$$

$$H'=1-\sum_{i=1}^{S}p_i^2 \quad (2)$$

$$H = -\sum_{i=1}^{S} p_i \ln(p_i) \tag{3}$$

$$E = \frac{H}{\ln(S)} \tag{4}$$

$$p_i = \frac{IV_i}{IV_{total}} \tag{5}$$

式中：*IV* 为重要值，*rh* 为相对高度，*ra* 为相对多度，*rc* 为相对盖度，*rf* 为相对频度；*H′* 为 Simpson 指数；*H* 为 Shannon-Wiener 指数；*E* 为 Pielou 均匀度指数；*i* 为样地内的植物物种 *i*，*S* 为样地内所有物种总和。

1.5.2 *β* 多样性

β 多样性为生境间多样性，表示环境梯度下不同生境间群落物种组成的相异性或物种沿环境梯度的更替速率，通过群落 *β* 多样性的测度可以比较不同地段的生境多样性。将不同山地的地理梯度带划分：海拔上以 100 m 为间隔，从低到高将实验样地划分成 9 个海拔梯度带（表 1）。选择基于二元属性数据测度的 Cody 指数和基于数量数据的 Bray-Curtis 指数进行 *β* 多样性的海拔梯度特征分析，计算公式如下：

$$\beta_{\mathrm{C}} = \frac{a + b - 2c}{2} \tag{6}$$

$$\beta_{\mathrm{B\text{-}C}} = \frac{2cIV}{a + b} \tag{7}$$

式中，β_{C} 为 Cody 指数，反映物种沿环境梯度的替代速率；$\beta_{\mathrm{B\text{-}C}}$ 为 Bray-Curtis 指数，体现群落物种组成的变化；*a* 和 *b* 分别为样地 A 和 B 群落各自的物种数，*c* 为两个样地群落共有的物种数；*cIV* 为样地 A 和 B 共有种中重要值较小者之和，即 $cIV = \sum \min(cIVa, cIVb)$。

1.5.3 *γ* 多样性

γ 多样性表示一个地理空间内各生境中的物种丰富度，多指区域或更大空间尺度下的物种数量。以吕梁山的管涔山、关帝山、五鹿山，每个山体、9 个海拔梯度带为单位，作为吕梁山草本群落的区域尺度，以每个区域内的总物种数目（总物种丰富度 S）为分析指标，分析吕梁山草本群落 *γ* 多样性的空间分布格局。

1.5.4 数据分析

本研究主要运用 IBM SPSS Statistics 24.0 和 Origin 2015 软件，对不同数据进行趋势分析、相关分析、多因素方差分析以及回归分析等处理和图形绘制。

2 结果与分析

2.1 物种多样性的海拔梯度变化

2.1.1 *α* 多样性

在垂直空间上，Simpson 指数（*H′*）、Shannon-Wiener 指数（*H*）和 Pielou 均匀度指数（*E*）的整体变化趋势一致，随海拔呈二次多项式函数变化，即中间高两边低的单峰变化格局（图 2），其中 *H′*的拟合度最高（$R^2 = 0.611$，$P < 0.01$），其次是 *H*（$R^2 = 0.575$，$P < 0.01$）、E（$R^2 = 0.122$，$P > 0.05$）。Pielou 均匀度指数在中海拔较为接近，表明中海拔内部环境较为均匀且

具有较高的物种多样性，与 H'、H 的变化表征相一致。从多因素方差分析看（表 2），在不同山地的不同海拔影响下，H 均达到极显著水平（$P<0.01$），H'达到显著水平（$P<0.05$），E 均表现为不显著差异（$P>0.05$）。整体来说，总体来看，α 多样性指数随海拔梯度变化一致，都随海拔的升高先升高后降低，即在中海拔最高，且不同海拔和山地对 H'、H 影响显著，对 E 影响不显著。

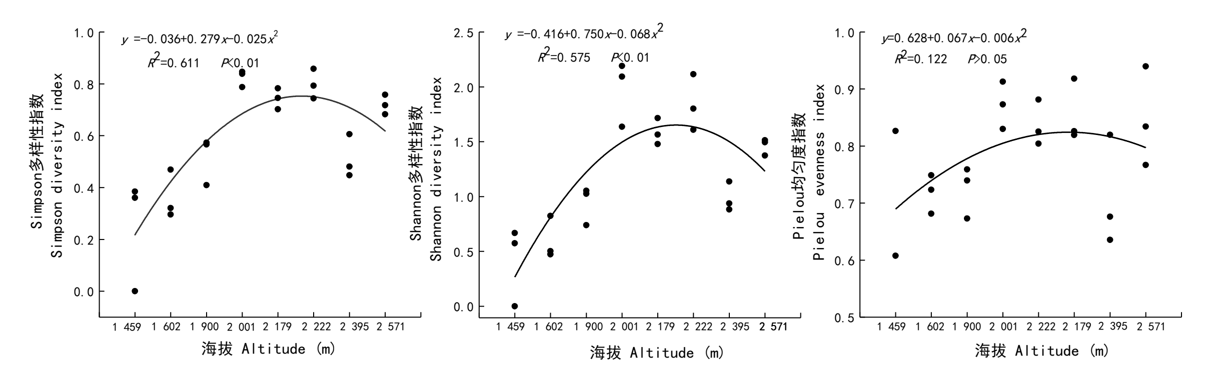


图 2 草本群落 α 多样性指数的垂直分布格局

Fig.2 Vertical distribution pattern of herbaceous community α-diversity indexes

表 2 α 多样性在不同海拔、山地下的多因素方差分析（P 值）

Table 2 Multivariate analysis of variance (P value) of α-diversity at different altitudes and mountains

分析类型 Analysis type	Simpson 指数 Simpson index	Shannon 指数 Shannon index	Pielou 指数 Pielou index
海拔 Altitude	0.02	0.00	0.16
山地 Mountain	0.00	0.00	0.21
海拔×山地 Altitude ×Mountain	0.00	0.00	0.08

2.1.2 β 多样性

随着海拔的升高，吕梁山草本群落间 Cody 指数（β_C）呈先急剧升高后平稳变化的趋势，最小值在 1 400~1 500 m 间，在 1 900~2 000 m 和 2 200~2 300 m 海拔带间达到最大值，且中海拔带呈平稳变化趋势；Bray-Curtis 指数（$\beta_{B\text{-}C}$）随着海拔的升高呈先急剧下降后平缓变化的趋势，与 β_C 指数变化相反（图 3），最大值在 1 400~1 500 m 间，最小值出现在 2 200~2 300 m。整体上，β 多样性在 1 400~2 000 m 海拔间出现急剧变化，因此 1 900~2 000 m 海拔带是吕梁山草本群落物种组成变化的过渡地带；在 2 000~2 300 m 海拔间差异较小，即中海拔表现为相对平缓的变化，表明草本群落从低海拔到高海拔的物种更新速率加快，中海拔间群落物种变化相对较小。

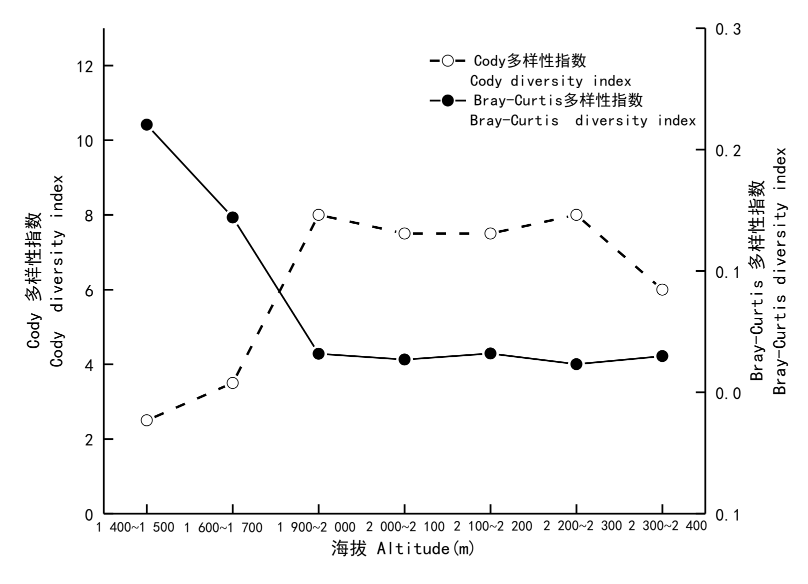


图 3 草本群落 β 多样性随海拔梯度的变化

Fig.3 Changes in β-diversity of herbaceous community with altitude gradients

2.1.3 γ 多样性

草本群落的 γ 多样性随着海拔的升高呈二次多项式函数变化（R^2=0.406，P<0.01），即先升高后降低的单峰分布格局（图 4）。总物种丰富度在海拔梯度上的变化范围为 1~14，平均值为 9，峰值在 2 000~2 100 m 的中海拔带，表明在吕梁山草本群落的物种在垂直空间上分布不均，中海拔带明显高于低、高海拔带。

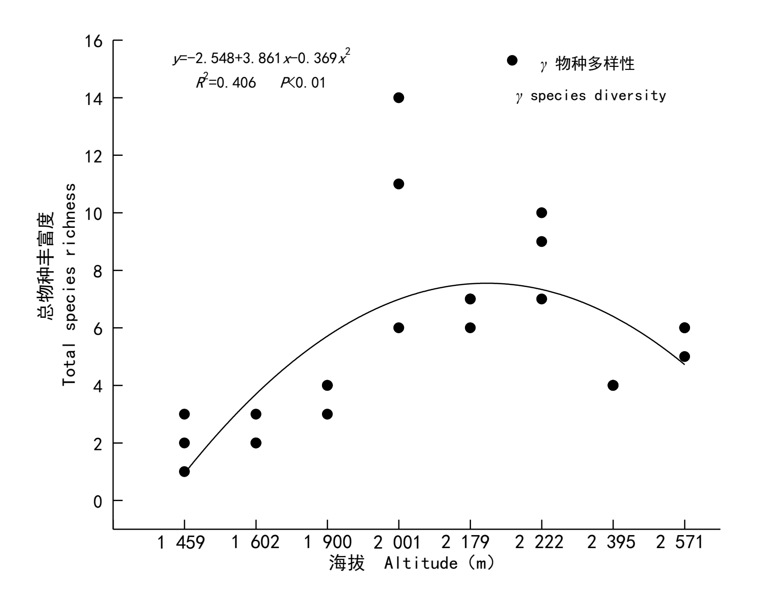


图 4 草本群落 γ 多样性的海拔梯度变化

Fig.4 Changes in γ-diversity of herbaceous community with altitude gradients

2.2 物种多样性与环境因子的关系

吕梁山草本群落的 α 多样性指数与空气温度均呈负相关关系，即随着空气温度的升高物种多样性呈减少趋势；H 与土壤温度呈正相关关系，H'、E 与土壤温度呈负相关关系；H'、H 和 E 与空气和土壤湿度均呈正相关关系，即随着湿度的升高物种多样性增加趋势，但水热因子与 α 多样性的关系均未达到显著水平（P＞0.05）（表 3）。对 α 多样性指数与水热因子进行回归分析（图 5），H'和 H 与空气温度、H 与空气湿度均符合二次函数关系（P＜0.05）

即随着空气温度升高，*H'*和 *H* 呈先下降后上升的变化；随着空气湿度的升高，*H* 呈先下降后上升的变化；除图 5 外，*α* 多样性指数与温湿度的回归分析均未达到显著水平（*P*＞0.05）。整体而言，温度、湿度的变化对 *α* 多样性的变化具有一定影响，但并不显著。

表 3 环境因子与 *α* 多样性的相关分析

Table 3 Correlation analysis between environmental factors and *α*-diversity indexes

因子 Factor	Simpson 指数 Simpson index	Shannon 指数 Shannon index	Pielou 指数 Pielou index
海拔 Altitude	0.30*	0.25*	0.25
空气温度 Air temperature	-0.124	-0.065	-0.137
土壤温度 Soil temperature	-0.068	0.003	-0.086
空气湿度 Air humidity	0.278	0.216	0.234
土壤湿度 Soil humidity	0.286	0.260	0.141

注：**表示在 0.01 水平上显著；*表示在 0.05 水平上显著。

Note: ** means correction significant at the 0.01 level; * means correction significant at the 0.05 level.

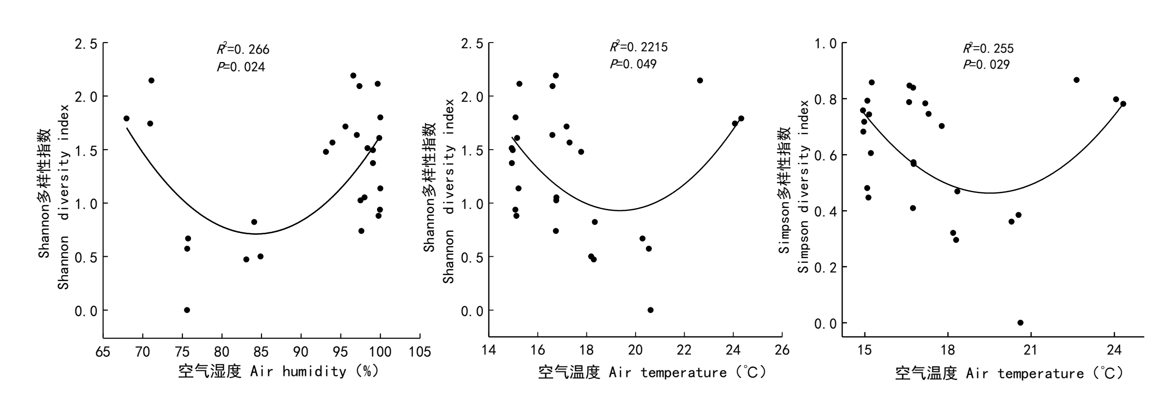


图 5 *α* 多样性指数与环境因子回归分析

Fig.5 Regression analysis of *α*-diversity indexes and environmental factors

3 讨论

3.1 物种多样性的空间分布

物种多样性沿地理梯度的变化包括热量、水分、地形等多种环境因子的综合影响，从而导致物种多样性的空间分布格局有很大差异性（陈斌等，2016）。沿海拔梯度的分布格局一般有 5 种形式（唐志尧和方精云，2004）：分别是沿海拔梯度先降后升、单峰曲线、单调升高、单调下降和无明显格局（李晋鹏等，2008）。本研究中 *α* 多样性和 *γ* 多样性随着海拔的升高呈中间高两边低的单峰曲线变化趋势，在中海拔（2 000~2 300 m）地区达到最大值，这与大多数的研究相一致。在大多数情况下，低海拔区域温度较高而水分相对缺少，加之受人为干扰的影响大而产生负面影响（冯建孟等，2006）；而在高海拔地区主要受热量限制，太阳辐射强、昼夜温差大等环境条件严重影响植物生长发育，因此物种多样性也较低。相对于低海拔和高海拔地区，中海拔地区的温度和降水量适宜，土壤深厚发育好，保水性较好，其水热条件更适宜植被生长，加之人为干扰相对较少，从而形成物种多样性的峰值区域（曲

波等，2012）。

β 多样性能够反映随着环境梯度变化植物群落间的差异性，或是快速变化的环境梯度中的物种组成的更替（张仕豪等，2019）。本研究中 Cody 指数和 Bray-Curtis 指数在 1 400~2 000 m 海拔间出现急剧变化，且在 1 900~2 000 m 海拔带间出现极值点，这表明从低海拔（1 400 m）到中海拔（2 000 m）之间草本群落间物种更新速率加快，物种间组成差异大，且 1 900~2 000 m 海拔带是明显的物种组成变化的过渡地带。许多研究表明山地植被群落间的过渡带具有高的物种多样性和更替速率（卢训令等，2010；邓清月等，2019），这一结果也与草本群落的 α 多样性和 γ 多样性在中海拔带出现峰值的结果相吻合，这一结论有利地验证了“中间膨胀效应”（Willis & Whittaker，2002）。

3.2 物种多样性与环境因子的关系

海拔的变化影响着山地生态系统的地理结构和水热过程，从而影响物种多样性的空间梯度变化（胡光成等，2009）。刘洋等（2007）在物种丰富度的研究中发现物种多样性的变化受到热量和水分的综合调控，不同的因子对物种丰富度海拔梯度格局的解释程度不同。O’Brien et al.（2000）在南非关于物种丰富度格局研究中建立的“水分-能量动态”模型认为水分和热量间的关系控制了植物的生理活动，进而影响物种多样性的变化格局。

在山地系统中有大量的环境因子用于解释物种多样性的分布格局，许多表征热量、水分的气候因子被认为与不同地区、不同尺度的多样性格局密切相关（Currie et al.，2004）。本研究中将海拔作为环境因子分析了其对 α 多样性的影响，结果表明海拔对多样性变化有显著地正相关影响。生境异质性高的地区能够提供更多的生态位，气候随着海拔的升高而变化，垂直立体气候特征越明显，生境类型越多样化，从而满足不同物种对生境的不同需求，使得物种多样性呈现增加趋势（叶鹏程等，2019）。

温度与 α 多样性呈现不显著的负相关，即随着温度升高物种多样性呈降低趋势；湿度对物种多样性的变化产生了正向的影响但不显著，这与前人的多数研究结果相反（Zhao & Fang，2006），这可能与研究区域尺度不同所导致。本研究区域吕梁山的整体跨度较小，跨纬度仅有 2°~3°，其所反映的水热因子变化不显著，从而对物种多样性的影响不显著。因此，为了探明吕梁山环境因子与植被物种多样性的关系，在后续的研究中应把握好研究尺度和因子的选择问题。

4 结论

吕梁山草本群落的 α 多样性在海拔梯度上呈现单峰变化模式，峰值在中海拔地区；β 多样性指数的变化表明 1 900~2 000 m 海拔带是草本群落物种组成变化的过渡地带；γ 多样性在海拔梯度上表现为单峰变化模式，草本群落物种多样性的变化符合“中间膨胀效应”。海拔是影响吕梁山草本植物群落物种多样性的主要因素，温度、湿度的变化对物种多样性的影响不显著。

参考文献：

CHE ZX, LI JJ, WANG YK, et al.，2018. Characteristics of soil temperature and water content variation in the western Qilian Mountains[J]. Acta Ecol Sin, 38(1): 205-111. [车宗玺，李进军，汪有奎，等，2018. 祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征[J]. 生态学报，38（1）：105-111.]

CHEN B, LI HD, CAO XZ, et al.，2016. Dynamic changes in vegetation coverage in the Yarlung Zangbo River basin based on SPOT-VGT NDVI[J]. J Mount Sci, 34 (2): 249-256. [陈斌，李海东，曹学章，等，2016. 基于 SPOT-VGT NDVI 的雅鲁藏布江流域植被动态变化[J]. 山地学报，34（2）：249-256.]

CURRIE DJ, MITTELBACH GG, CORNELL HV, et al.，2004. Predictions and tests of climate-based hypotheses of broad-scale variation in taxonomic richness[J]. Ecol Lett, 7(12): 1121-1134.

DENG QY, ZHANG XL, NIU JJ, et al.，2019. Species Diversity of plant communities along an altitude gradient in Yinmachi Mountain, Northwestern Shanxi, China[J]. Ecol Environ, 28(5): 865-872. [邓清月，张晓龙，牛俊杰，等，2019. 晋西北饮马池山植物群落物种多样性沿海拔梯度的变化[J]. 生态环境学报，28（5）：865-872.]

FANG JY, SHEN ZH, CUI HT, 2004. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology[J]. Biodivers Sci, 12(1): 10-19. [方精云，沈泽昊，崔海亭，2004. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容[J]. 生物多样性，12（1）：10-19.]

FENG JM, HU XK, 2019. Effects of environmental factors on spatial patterns of plant diversity in Northwest Yunnan[J]. J Xinyang Nor Univ (Nat Sci Ed), 32(1): 62-68. [冯建孟，胡小康，2019. 环境因子对滇西北地区植物多样性分布格局的影响[J]. 信阳师范学院学报（自然科学版），32（1）：62-68.]

FENG JP, WANG XP, XU CD, et al.，2006. Altitudinal patterns of plant species diversity and community structure on Yulong Mountains, Yunnan, China[J]. J Mount Sci, 24(1): 110-116. [冯建孟，王襄平，徐成东，等，2006. 玉龙雪山植物物种多样性和群落结构沿海拔梯度的分布格局[J]. 山地学报，24（1）：110-116.]

FRASER LH, PITHER J, JENTSCH A, et al.，2015. Worldwide evidence of a unimodal relationship between productivity and plant species richness[J]. Science, 349(6245): 302-305.

GASTON KJ, DAVIES RG, ORME CDL, et al.，2007. Spatial turnover in the global avifauna[J]. Proc Roy Soc B-Biol Sci, 274(1618): 1567-1574.

HE JS, CHEN WL, 1997. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities[J]. Acta Ecol Sin, 17(1): 91-99. [贺金生，陈伟烈，1997. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征[J]. 生态学报，17（1）：91-99.]

HE YH, Yan M, Zhang QD, et al.，2013. Altitudinal pattern of plant species diversity in the Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi, China[J]. Acta Ecol Sin, 33(8): 2452-2462. [何艳华，闫明，张钦弟，等，2013. 五鹿山国家级自然保护区物种多样性海拔格局[J]. 生态学报，33（8）：2452-2462.]

HU GC, JIN XM, WAN L, et al.，2009. The relationship between vegetation growth and the combination of water and heat in the Qilian Mountain[J]. J Arid Land Resour Environ, 23(2): 17-20. [胡光成，金晓媚，万力，等，2009. 祁连山区植被生长与水热组合关系研究[J]. 干旱区资源与环境，23（2）：17-20.]

HU J, LV YH, FU BJ, et al.，2017. Soil hydrothermal variation and rainfall pulses along altitudinal gradient in Pailugou Watershed in the Qilian Mountain[J]. Arid Zone Res, 34(1): 151-160. [胡健，吕一河，傅伯杰，等，2017. 祁连山排露沟流域土壤水热与降雨脉动沿海拔梯度变化[J]. 干旱区研究，34（1）：151-160.]

JIN SH, LIU T, PANG XP, et al.，2017. Effects of plateau pika (*Ochotona crzoniae*) disturbances on plant species diversity and aboveground plant biomass in a *Kobresia pygmaea* meadow in the Qinghai Lake Region[J]. Acta Pratac Sin, 26(5): 29-39. [金少红，刘彤，庞晓攀，等，2017. 高原鼠兔干扰对青海湖流域高山嵩草草甸植物多样性及地上生物量的影响[J]. 草业学报，26（5）：29-39.]

KESSLER M, 2000. Elevational gradients in species richness and endemism of selected plant groups in the central Bolivian Andes[J]. Plant Ecol, 149(2): 181-193.

LI JP, SHANGGUAN TL, GUO DG, et al.，2008. Study on relationship between species diversity of plant community and environment in south Lüliang Mountains, Shanxi[J]. J Mount Sci, 26(5): 612-619. [李晋鹏，上官铁梁，郭东罡，等，2008. 山西吕梁山南段植物群落物种多样性与环境的关系[J]. 山地学报，26（5）：612-619.]

LIU Y, ZHANG J, YANG WQ, 2009. Responses of alpine biodiversity to climate change[J]. Biodiv Sci, 17(1): 88-96. [刘洋，张健，杨万勤，2009. 高山生物多样性对气候变化响应的研究进展[J]. 生物多样性，17（1）：88-96.]

LIU Y, ZHANG YP, HE DM, et al.，2007. Elevational patterns of species richness and climate[J]. Chin Sci Bull, 52(S2): 43-50. [刘洋，张一平，何大明，等，2007. 纵向岭谷区山地植物物种丰富度垂直分布格局及气候解释[J]. 科学通报，52（S2）：43-50.]

LU XL, HU N, DING SY, et al.，2010. The pattern of plant species diversity of Funiu Mountain Nature Reserve[J]. Acta Ecol Sin, 30(21): 5790-5798. [卢训令，胡楠，丁圣彦，等，2010. 伏牛山自然保护区物种多样性分布格局[J]. 生态学报，30（21）：5790-5798.]

LUO LM, MIAO YJ, WU JS, et al.，2014. Variation in the biodiversity of montane shrub grassland communities along an altitudinal gradient in a Lhasa River basin valley[J]. Acta Prat Sin, 23(6): 320-326. [罗黎鸣，苗彦军，武建双，等，2014. 拉萨河谷山地灌丛草地物种多样性随海拔升高的变化特征[J]. 草业学报，23（6）：320-326.]

O'BRIEN EM, WHITTAKER FRJ, 2000. Climatic gradients in woody plant (tree and shrub) diversity: water-energy dynamics, residual variation, and topography[J]. Oikos, 89(3): 588-600.

QU B, MIAO YM, ZHANG QD, et al.，2012. Plant diversity and its elevational gradient patterns in Wulu Mountain, Shanxi, China[J]. Plant Diver Resour, 34(4): 110-116. [曲波，苗艳明，张钦弟，等，2012. 山西五鹿山植物物种多样性及其海拔梯度格局[J]. 植物分类与资源学报，34（4）：376-382.]

REY BENAYAS JM, SCHEINER SM, 2002. Plant diversity, biogeography and environment in Iberia: patterns and possible causal factors[J]. J Veg Sci, 13(2): 245-258.

SHELDON KS, YANG S, TEWKSBURY JJ, 2011. Climate change and community disassembly: impacts of warming on tropical and temperate montane community structure[J]. Ecol Lett, 14(12): 1191-1200.

SU C, ZHANG XY, MA WH, et al.，2018. Altitudinal pattern and environmental interpretation of species diversity of scrub communty in the Helan Mountains, China[J]. J Mount Sci, 36(5): 699-708. [苏闯，张芯毓，马文红，等，2018. 贺兰山灌丛群落物种多样性海拔格局及环境解释[J]. 山地学报，36（5）：699-708.]

TANG ZY, FANG JY, CHI XL, et al.，2012. Patterns of plant beta diversity along elevational and latitudinal gradients in mountain forests of China[J]. Ecography, 35(12): 1083-1091.

TANG ZY, FANG JY, 2004. A review on the elevational patterns of plant species diversity[J]. Biodivers Sci, 12(1): 20-28. [唐志尧，方精云，2004. 植物物种多样性的垂直分布格局[J]. 生物多样性，12（1）：20-28.]

TIAN HF, LIU HM, WANG W, et al.，2012. The distribution patterns of biodiversity and environmental interpretation in Daqingshan Mountain[J]. J Arid Land Resour Environ, 28(8): 376-382. [田海芬，刘华民，王炜，等，2012. 大青山山地植物区系及生物多样性研究[J]. 干旱区资源与环境，28（8）：172-177.]

WANG GH, ZHOU GS, YANG LM, et al.，2002. Distribution, species diversity and life-form spectra of plant communities along an altitudinal gradient in the northern slopes of

Qilianshan Mountains, Gansu, China[J]. Plant Ecol, 165(2): 169-181.

WHITTAKER RJ, WILLIS KJ, FIELD R, 2001. Scale and species richness: towards a general, hierarchical theory of species diversity[J]. J Biogeogr, 28(4): 453-470.

WILLIS KJ, WHITTAKER RJ, 2002. Species diversity scale matters[J]. Science, 295(5558): 1245-1248.

XUN MH, JIA YY, ZHANG XY, et al.， 2018. Evaluation of agricultural economic development and its spatial-temporal distribution in contiguous dire poverty-stricken areas of Lüliang District in Shanxi[J]. J Agric, 8(5): 73-80. [徐满厚，贾燕燕，张潇月，等，2018. 山西吕梁连片特困区农业经济发展评价及其时空分布特征[J]. 农学学报，8（5）：73-80.]

YAN WD, TIAN DL, 2006. Microclimate characteristic of *Cinnamomum camphor* plantation[J]. J NW For Univ, 21(2): 30-34. [闫文德，田大伦，2006. 樟树人工林小气候特征研究[J]. 西北林学院学报，21（2）：30-34.]

YANG XY, ZAHNG SX, WEN J, et al.，2018. Spatial pattern of herbaceous plant species diversity and its changes due to simulated warming in the forest community of the Lüliang Mountains[J]. Acta Ecol Sin, 38(18): 6642-6654. [杨晓艳，张世雄，温静等，2018. 吕梁山森林群落草本层植物物种多样性的空间格局及其对模拟增温的响应[J]. 生态学报，38（18）：6642-6654.]

YE PC, CHEN H, WU JY, et al.， 2019. Distribution pattern and correlation with main environmental factors of higher plant diversity in Northwest Yunnan[J]. J Ecol Rur Environ, 35(11): 1-6. [叶鹏程，陈慧，武建勇，等，2018. 滇西北高等植物多样性分布格局及其与主要环境因子的相关性分析[J]. 生态与农村环境学报，35（11）：1-6.]

ZHANG SH, XIONG KN, ZHANG Y, et al.，2019. Response of plant community species diversity and leaf traits of dominant species to environmental factors in different grades of rocky desertification areas[J]. Guihaia, 39(8): 1069-1080. [张仕豪，熊康宁，张俞等，2019. 不同等级石漠化地区植物群落物种多样性及优势种叶片性状对环境因子的响应[J]. 广西植物，39（8）：1069-1080.]

ZHAO SQ, FANG JY, 2006. Patterns of species richness for vascular plants in China's nature reserves[J]. Divers Distribut, 12(4): 364-372.

ZHENG CY, FANG JY, 2004. Changes in air temperature varibles along altitudinal gradient in Mt.Huanggang, China[J]. Acta Meteorol Sin, 62(2): 251-255. [郑成洋，方精云，2004. 福建黄岗山东南坡气温的垂直变化[J]. 气象学报，24（2）：251-255.]

ZHU L, XU GQ, LI Y, et al.， 2017. Relationships among plant species diversity, biomass, and the groundwater table in the Hailiutu River basin[J]. Acta Ecol Sin, 37(6): 1912-1921. [朱丽，徐贵青，李彦，等，2017. 物种多样性及生物量与地下水位的关系——以海流兔河流域为例[J]. 生态学报，37（6）：1912-1921.]